

PERUBAHAN KOEFISIEN STABILITAS (K_d) LAPIS LINDUNG GAMAPOD AKIBAT PATAH SALAH SATU KAKINYA

Warniyati¹⁾ dan Triatmadja, R²⁾

ABSTRACT

Gamapod is a symmetrical four legs material used for armoring rubblemound breakwaters. Past researches indicated that the material has higher stability number than the Tetrapod

Previous researches on Gamapod stability were conducted only up to 10% of breakwater damage and no broken Gamapods were considered. The inclusion of broken Gamapods, for example one of the legs is broken, certainly may reduce the overall stability number. The broken Gamapod may be resulted from low quality of Gamapod, careless installation, and due to extreme wave attack. It is of interest to investigate the stability number of Gamapod armor layer with various percentage of broken units.

The results of the experiment showed that damage there are significant reduction of Gamapod stability number at 5%, 10% and 15%. At less than 10% damage there there was also a different pattern of damage curve. The damage curve become similar to that of Gamapod armor layer without broken units as the damage percentage higher than 10.

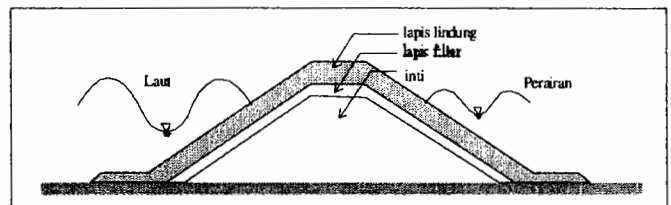
PENDAHULUAN

Dewasa ini struktur pemecah gelombang tumpukan batu telah banyak digunakan untuk melindungi pantai dari serangan gelombang. Pemecah gelombang ini dibangun secara berlapis supaya ekonomis, yaitu lapis terluar dinamakan lapis lindung dan lapis paling dalam dinamakan inti. Diantara kedua lapisan tersebut dibuat lapis filter. Lapis paling luar tersusun dari material yang paling besar dan paling berat sedang makin kedalam ukurannya makin kecil. Lapis terluar inilah yang paling mahal sehingga perlu dihemat.

Stabilitas lapis lindung struktur pemecah gelombang tergantung pada bentuk dan kekasaran butir, tata letak material, kemiringan sisi bangunan, berat material, berat jenis material, porositas bangunan, gaya external dan lain-lain. Lapis lindung pada pemecah gelombang dapat disusun dari batu alam maupun batu buatan (gambar 1). Penggunaan batu alam sebagai material lapis lindung kadang-kadang memberikan beberapa kendala. Hal ini karena bentuk dan kekasarannya memberikan kekuatan saling kunci yang rendah sehingga kurang stabil, selain itu di beberapa daerah kadang sulit untuk mendapatkan batu alam dengan ukuran, berat dan jumlah yang mencukupi. Salah satu cara untuk mengatasi hal tersebut, adalah penggunaan material lapis lindung batu buatan dari beton. Dengan demikian diharapkan dapat diperoleh hal-hal berikut :

1. kekuatan saling kunci yang tinggi,
2. berat tiap unit berkurang (dengan demikian volume tiap unit juga berkurang),
3. lebih ekonomis,
4. terjaminnya keberadaan material.

Salah satu jenis batu buatan yang banyak digunakan adalah jenis tetrapod. Seiring dengan meningkatnya penggunaan tetrapod, Triatmadja (1994) mengadakan modifikasi yang mengambil bentuk dasar dari tetrapod dengan empat buah kaki simetris dengan diameter kaki dari bagian pangkal hingga ujung adalah sama (dalam sulistyawati, 1996).



Gambar 1. Pemecah gelombang tumpukan batu

Karya Tulis ini merupakan sebagian dari hasil penelitian Tugas Akhir dengan Judul Karakteristik Kerusakan Lapis Lindung Gamapod Karena serangan Gelombang. Selain mengkaji penurunan nilai koefisien stabilitas lapis lindung gamapod akibat adanya gamapod yang patah salah satu kakinya, dalam Tugas Akhir tersebut penulis juga mengkaji tentang

¹ Warniyati, S.T., Mahasiswa Pasca Sarjana, Universitas Gadjah Mada

² Dr. Ir. Radiana Triatmadja, Peneliti, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik UGM

perubahan profil pemecah gelombang, kondisi stabil pemecah gelombang pada tingkat kerusakan tinggi, lokasi kerusakan lapis lindung gamapod terhadap muka air dan perbedaan karakter kerusakan lapis lindung gamapod dan tetrapod.

STABILITAS UNIT LAPIS LINDUNG

Macam-Macam Lapis Lindung

Lapis lindung pada pemecah gelombang dapat disusun dari batu alam maupun batu buatan. Batu buatan ini bisa berbentuk sederhana (kubus) yang memerlukan berat yang cukup besar, atau bentuk khusus yang lebih ringan. Batu buatan ini bisa berupa tetrapod, tribar, quadripod, dolos dan sebagainya. Tetrapod mempunyai empat kaki yang berbentuk kerucut terpancung. Tribar terdiri dari tiga kaki. Quadripod mempunyai bentuk serupa dengan tribar tetapi sumbu-sumbu ketiga kakinya berada pada satu bidang datar. Dolos terdiri dari dua kaki saling menyilang (Triatmadja, B., 1992). Tetrapod banyak dipakai/disukai karena bentuknya yang simetris sehingga pemasangannya mudah.

Jenis-Jenis/Penyebab Kerusakan Pemecah Gelombang

Kerusakan pemecah gelombang bisa terjadi karena faktor perencanaan, pelaksanaan, pemeliharaan dan faktor kondisi setempat. Jenis-jenis kerusakan pemecah gelombang ada beberapa macam dan biasanya disebabkan oleh lebih dari satu parameter. Kerusakan pemecah gelombang secara umum dan parameter yang mempengaruhi adalah sebagai berikut (CIRIA, 1991).

1. Penurunan dasar

Kerusakan ini disebabkan oleh tekanan air, mampatnya lapisan struktur, berat spesifik struktur dan daya dukung tanah yang kurang baik.

2. Pergerakan unit lapis lindung

Kerusakan ini disebabkan oleh gaya gelombang, kemiringan lereng, kekuatan saling kunci antar material, permeabilitas struktur, berat jenis material dan ukuran material.

3. Pergeseran material lapis inti

Kerusakan ini disebabkan oleh aliran arus dalam struktur, perbedaan tekanan air, ketebalan lapisan porus dan ukuran butir material.

4. Piping

Piping disebabkan oleh perbedaan tekanan air yang dibatasi oleh lapisan struktur yang permeabel.

5. Pergeseran struktur

Pergeseran struktur disebabkan oleh gaya gelombang dan beban struktur atas yang bekerja pada lapisan yang kurang stabil.

6. Gerusan pada dasar kaki

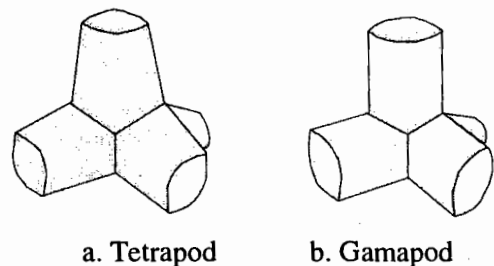
Gerusan disebabkan oleh kecepatan dan turbulensi arus maupun gelombang, ukuran butir material dan permeabilitas struktur.

7. Kehancuran struktur

Kehancuran struktur bisa disebabkan oleh tekanan air, gaya gelombang dan gempa bumi. Selain faktor-faktor tersebut diatas struktur pemecah gelombang juga bisa mengalami kerusakan karena rusaknya material penyusun lapis lindung, misalnya adanya kaki material lapis lindung dari batu buatan yang patah atau hancurnya material lapis lindung.

Lapis Lindung Gamapod

Gamapod adalah salah satu batu buatan sebagai alternatif bahan lapis lindung pemecah gelombang. Perbedaan bentuk geometri gamapod dan tetrapod dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Bentuk geometri tetrapod dan gamapod

Bentuk geometri gamapod dengan empat kaki simetris yang relatif lebih langsing dibandingkan dengan tetrapod memungkinkan bertambahnya tingkat saling kunci antar material satu dengan yang lain. Dalam SPM (1984), tetrapod sebagai lapis lindung pemecah gelombang dengan susunan dua lapis, perletakan secara acak, kemiringan lereng ($\cot \theta = 2$) memberikan nilai koefisien stabilitas (K_d) antara 4,5 sampai 5,5.

Sejauh ini telah dilakukan beberapa penelitian mengenai material gamapod ini. Winarno (1993) melakukan penelitian yang menekankan pada perbandingan nilai koefisien stabilitas gamapod dengan tetrapod pada spektrum energi gelombang Bretschneider dan JONSWAP. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa nilai koefisien stabilitas (K_d) gamapod adalah sebesar empat kali nilai stabilitas tetrapod untuk kedua spektrum.

Dari tinjauan mekanika bahan tetrapod akan lebih aman dari bahaya patah dibanding gamapod, sehingga Triatmadja dan Tantrawati (1994) melakukan penelitian optimalisasi panjang kaki gamapod. Penelitian tersebut menggunakan material gamapod dengan panjang kaki standar, 0,8 dan 0,5 panjang kaki standar. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa panjang kaki gamapod yang optimal adalah 0,8 panjang kaki standar. Disamping itu Triatmadja dan Tantrawati menyatakan bahwa gamapod dengan panjang kaki standar memberikan nilai kd 2,6 kali Kd tetrapod. Gamapod dengan panjang kaki 0,8 panjang kaki standar mempunyai Kd antara 6 sampai 17 sedangkan gamapod dengan panjang kaki 0,5 panjang kaki standar mempunyai nilai Kd mendekati Kd tetrapod. Dalam hal ini perbedaan nilai Kd tidak signifikan.

Untuk mendapatkan konstruksi yang lebih ekonomis, Sulistyawati (1995) melakukan penelitian kombinasi gamapod dengan batu pecah sebagai lapis lindung campuran dan mengkaji pengaruh efek skala pada stabilitas akibat penggunaan berat jenis yang berbeda. Hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa dengan penambahan batu pecah koefisien stabilitas lapis lindung campuran lebih tinggi dan volume batu pecah yang optimal adalah $0,3 \times \text{volume pori}$. Penggunaan berat jenis yang berbeda tidak berpengaruh terhadap nilai koefisien stabilitas.

Semua penelitian mengenai material gamapod ini hanya memperhitungkan tingkat kerusakan sampai dengan 10% dengan kondisi semua kakinya utuh. Padahal pada saat pemasangannya dan selama masa pelayanan kemungkinan ada gamapod yang patah kakinya. Adanya gamapod yang patah kakinya ini tentunya akan mengurangi ikatan antar material gamapod, sehingga stabilitas gamapod akan berkurang. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian untuk mengetahui pengaruh patahnya kaki gamapod terhadap stabilitas lapis lindung gamapod. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi keperluan perancangan struktur pemecah gelombang dengan lapis lindung gamapod. Disamping itu juga diharapkan dapat memberikan sumbangan khasanah ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil pada umumnya dan bidang teknik pantai pada khususnya.

Gaya pada Material Lapis Lindung yang Tidak Saling Mengikat

Gaya yang bekerja pada material lapis lindung adalah gaya hidrodinamik. Gaya-gaya hidrodinamik tersebut adalah gaya angkat (*lift force*) F_L dan gaya seret (*drag force*) F_D (Jansen, 1984). Gaya-gaya tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$F_L = C_L 1/2 \rho_w A u^2 \quad (1)$$

$$F_D = C_D 1/2 \rho_w A u^2 \quad (2)$$

dengan C_D koefisien seret, C_L = koefisien angkat, ρ_w = massa jenis air, u = kecepatan partikel air, A = luas bidang permukaan unit lapis lindung yang terkena serangan gelombang

Gabungan dari gaya angkat dan gaya seret disebut resultan gaya hidrodinamik, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$F_R = C 1/2 \rho_w A u^2 \quad (3)$$

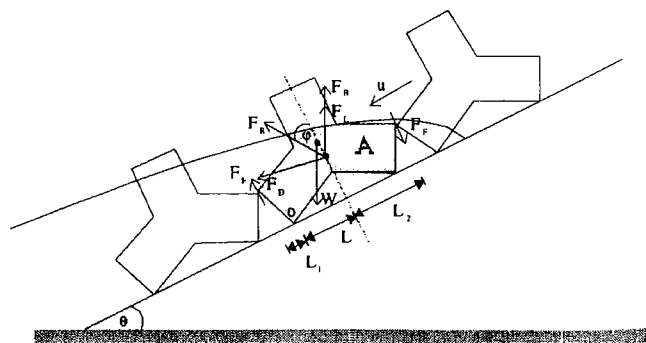
Kecepatan partikel air pada saat terjadi *run-down* pada dinding lereng lapis lindung didekati dengan rumus : (Jensen, 1984)

$$u = \alpha \sqrt{2gH} \quad (4)$$

dengan α koefisien kecepatan, g percepatan gravitasi bumi dan H tinggi gelombang, Dengan mensubstitusikan persamaan (4) kedalam persamaan (3) diperoleh:

$$F_R = C \rho_w \alpha^2 g H D^2 \pi/4 \quad (5)$$

Gambar 3. memperlihatkan gaya yang bekerja pada luasan material gamapod yang terkena serangan gelombang pada saat *run-down* (air turun). Material yang terkena serangan gelombang mendapat gaya hidrodinamik pada luasan A (bagian yang diarsir). Material tersebut akan mengguling atau menggeser dan menyebabkan tergulingnya atau tergesernya material yang ada di atasnya dan seterusnya.



Gambar 3. Gaya yang bekerja pada material lapis lindung

Kondisi kritis material lapis lindung dicapai pada saat momen gulingnya sama dengan momen yang mempertahankan. Dengan anggapan dua dimensi, tanpa adanya ikatan tapi hanya ada gaya gesek antar material dan stabilitas terhadap guling pada titik o (gambar 3), maka gaya untuk menggulingkan material dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_R \cos \phi L + F_B \cos \theta L = W \cos \theta L + F_F L_1 + F_F (L_2 + L)$$

$$F_R = \frac{(W - F_B) \cos \theta}{\cos \phi} + \frac{F_F (L_1 + L_2 + L)}{L \cos \phi} \quad (6)$$

dengan F_R resultan gaya hidrodinamik, F_B gaya apung, W berat material utuh, L jarak pusat gaya terhadap pusat momen. Apabila material gamapod patah salah satu kakinya, maka gaya yang dibutuhkan untuk mengguling dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_R = \frac{(W' - F_B) \cos \theta}{\cos \phi} + \frac{F_F (L_1 + L_2 + L)}{L \cos \phi} \quad (7)$$

dengan W' adalah berat material yang patah salah satu kakinya. Dalam hal ini W' kira kira $0,75W$ yang berarti F'_R lebih kecil dari F_R .

Hudson (dalam Jensen, 1984) menunjukkan untuk bentuk bola W berbanding lurus dengan H^3

$$W = \frac{\gamma_S H^3}{K_d \Delta^3 \cot \theta} \quad (8)$$

Dengan memperhatikan persamaan 5 dan 8 berarti W berbanding lurus dengan F_R^3/D^6 . Jadi pengurangan W harus diikuti dengan pengurangan F_R^3/D^6 agar lapis lindung tetap dalam keadaan stabil. Ada kemungkinan pada posisi tertentu, gamapod yang patah salah satu kakinya terserang gelombang sebesar gamapod utuh, sehingga D pada persamaan 5 masih berlaku. Dengan demikian gamapod yang patah salah satu kakinya akan berkurang stabilitasnya jika resultan gaya hidrodinamik yang bekerja sama dengan resultan gaya hidrodinamik yang bekerja pada gamapod yang kakinya utuh.

Gaya-Gaya pada Material Lapis Lindung Gamapod yang Saling Terkait (Saling Kunci)

Bentuk dan posisi material mempengaruhi kekuatan saling kunci antar material. Gaya yang dibutuhkan oleh material yang di tengah untuk mengguling merupakan jumlahan dari gaya yang dibutuhkan untuk menggulingkan material yang

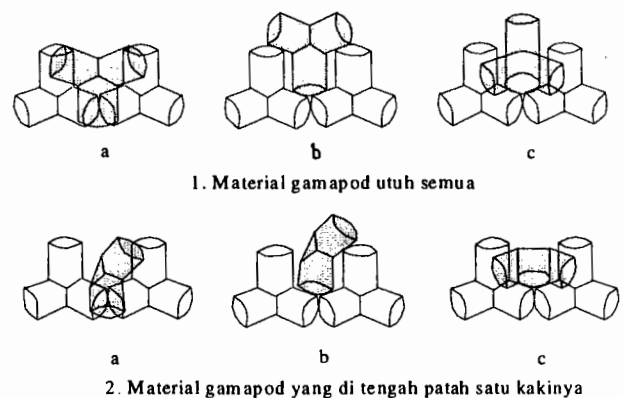
mengikatnya dan material itu sendiri. Gaya tersebut seperti terlihat pada gambar 1 dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_R = \left(\sum_{i=1}^n \frac{((W_i - F_{Bi}) \cos \theta - F_{Ri} \cos \phi) L_i}{L \cos \phi} \right) + \frac{(W - F_B) \cos \theta}{L \cos \phi} + F_F \quad (9)$$

dengan n adalah jumlah material yang mengikat, L adalah jarak pusat gaya terhadap pusat momen.

Apabila di letakkan secara acak posisi material gamapod ada banyak kemungkinan yang jumlahnya tidak terhingga. Gambar 4 memperlihatkan beberapa kemungkinan posisi material gamapod. Dengan memperhatikan persamaan 9 material gamapod yang patah salah satu kakinya akan membutuhkan gaya guling yang lebih kecil. Pada posisi 1a dengan material gamapod utuh semua, material yang ditengah sulit untuk mengguling ke depan karena dua kakinya yang di atas terikat oleh material yang ada di sampingnya. Pada posisi 2a material yang di tengah patah salah satu kakinya. Material yang ditengah akan lebih mudah untuk mengguling ke depan karena hanya satu kakinya yang terikat oleh material yang disampingnya maupun karena berat materialnya sendiri yang berkurang yang mengakibatkan stabilitasnya turun. Pada posisi 1b dan 2b material yang di tengah tidak mempunyai ikatan dengan material yang ada di sampingnya. Namun pada posisi 2b material yang di tengah lebih ringan sehingga akan lebih mudah terangkat oleh gaya gelombang dan gaya apung.

Posisi 1c material yang di tengah dua kakinya terikat oleh material yang di sampingnya sehingga sulit untuk mengguling ke depan. Posisi 2c material yang di tengah kondisi ikatannya sama dengan posisi 1c namun karena beratnya lebih kecil, maka stabilitasnya lebih kecil sehingga material tersebut akan lebih mudah terangkat oleh gaya gelombang maupun gaya apung.



Gambar 4. Kemungkinan posisi material gamapod

Statistika Gelombang

Gelombang untuk pengujian mempunyai tinggi dan periode yang berubah-ubah. Frekuensi penyebaran gelombang merupakan fungsi yang berubah terhadap waktu. Untuk mempermudah penelitian penyebaran tinggi gelombang tersebut digunakan pendekatan statistik, yaitu dengan membuat hubungan antara persentase kejadian terhadap masing-masing tinggi gelombang yang tercatat.

Distribusi tinggi gelombang yang biasa digunakan adalah distribusi Rayleigh. Distribusi Rayleigh dirumuskan pada persamaan 10 (Dean and Dalrymple, 1984). Kondisi gelombang di laut menunjukkan kesamaan dengan distribusi Rayleigh.

Berdasarkan distribusi Rayleigh diperoleh :

$$H_s = \sqrt{2} H_{rms} \quad (10)$$

$$H_{maks} = H_{rms} (\ln N)^2 \quad (11)$$

dengan $H_s = H_{33}$ = rerata 33% gelombang tertinggi dari seluruh gelombang yang terjadi, H_{mak} = tinggi gelombang maksimum yang terjadi.

Persamaan tersebut diatas menunjukkan bahwa jumlah gelombang menentukan besarnya tinggi gelombang maksimum, selanjutnya besarnya tinggi gelombang sangat berpengaruh terhadap tingkat kerusakan lapis lindung (sesuai dengan persamaan 5). Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan waktu standar 75 menit dengan periode rata-rata 1,414 detik untuk mendapatkan jumlah serangan gelombang lebih dari 3000 (Coastal Engineering II, 1987 dalam Legawa, A.H.S., 1997).

MODEL FISIK STABILITAS LAPIS LINDUNG GAMAPOD

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan pembuatan model yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

1. batu pecah dengan berat 0,5 - 1,5 gram sebagai material penyusun inti
2. batu pecah dengan berat 1,4 - 3,0 gram sebagai material penyusun filter
3. model gamapod dengan ukuran panjang kaki 1,25 cm dengan diameter kaki 1,4 cm
4. pasir laut untuk membuat model pantai (*foreshore*).

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah saluran gelombang (*wave flume*) yang dilengkapi dengan alat pembangkit gelombang (*wave generator*), alat kontrol dan alat ukur. alat-alat lain yang diperlukan dalam penelitian ini adalah: alat ukur tinggi gelombang (*wave gauges*), potensiometer, *floppy disk*, kertas *continuous form* dan *bed profiler*.

Pembuatan Model

Pada penelitian ini digunakan model tak distorsi dengan skala geometri 1:50 dan kriteria sebangun dinamik bilangan Froude. Model pemecah gelombang dibuat dengan kemiringan lereng depan 1:2. Tinggi puncak pemecah gelombang dari dasar kaki adalah 46,25 cm, lebar puncak pemecah gelombang 15 cm. Saluran gelombang dibuat dengan kelandaian 1:10. Lereng pemecah gelombang bagian depan dibagi menjadi tujuh lajur luasan masing-masing dengan panjang 40 cm, lebar 15 cm. Setiap luasan diberi material lapis lindung dengan warna berbeda-beda. Masing-masing lebar luasan diisi 4-5 baris material. Sedangkan kedalaman air di depan alat pembangkit gelombang dari dasar saluran adalah 45 cm. Tata letak model diberikan pada Gambar 5 dan 6.

Jumlah Material Lapis Lindung

Jumlah minimum material lapis lindung untuk suatu luasan tertentu dihitung dengan rumus sebagai berikut (Jensen, 1984) :

$$N = c \cdot n \cdot (1 - P/100) \cdot V^{2/3} \cdot A \quad (12)$$

dengan N jumlah material seluas A, c faktor bentuk (= 1), n jumlah lapis lindung (= 2), P porositas material lapis lindung (= 50), A luasan yang terisi material, V volume material lapis lindung.

Pada penelitian ini untuk setiap lajur mempunyai luasan $40 \times 15 \text{ cm}^2$ dan material lapis lindung yang digunakan mempunyai volume rata-rata $13,5 \text{ cm}^3$. Dengan persamaan 12 diperoleh jumlah minimum material gamapod untuk setiap lajur sebanyak 106 unit, jumlah material gamapod yang digunakan adalah 115 unit.

Kriteria Kerusakan

Kriteria kerusakan yang dijadikan sebagai pedoman adalah persen material yang berpindah dari lajur (horisontal) yang satu ke lajur yang lain terhadap jumlah material yang terkena serangan gelombang. Untuk memudahkan pengamatan material yang berpindah lajur, maka untuk setiap lajur horisontal diberi warna yang berbeda. Material yang terkena serangan gelombang diasumsikan pada material yang berada pada luasan antara $+1,5 H_s$ dan $-1,5 H_s$ dari muka air tenang (Jensen, 1984).

Pengujian Stabilitas Lapis Lindung

Pengujian stabilitas lapis lindung dilakukan dalam dua tahap.

a. Pengujian tahap I

Pengujian model tahap I ini dilakukan dengan langkah sebagai berikut.

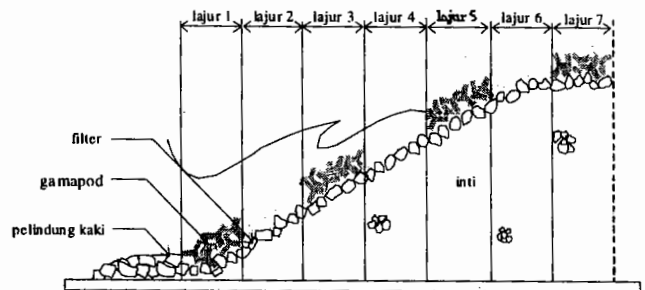
1. Model pemecah gelombang disusun dalam saluran gelombang. Penekanan penelitian pada sisi muka pemecah gelombang sehingga gamapod disusun pada sisi muka pemecah gelombang menjadi tujuh lajur luasan dengan warna yang berbeda-beda. (gambar 5 dan 6).
2. Kalibrasi harian.
3. Model dikenai serangan gelombang dengan periode rata-rata 1,414 detik selama 75 menit dengan spektrum energi gelombang Bretschneider mulai dari tinggi gelombang signifikan yang belum mengakibatkan kerusakan lapis lindung ($H_s = 5$ cm model). Pada setiap akhir pengujian posisi material tidak diperbaiki.
4. Pengujian dengan H_s yang lebih besar lagi beberapa kali hingga mencapai kerusakan $>50\%$.
5. Pada setiap akhir pengujian dilakukan pencatatan kerusakan lapis lindung yang terjadi dan pengukuran profil model pemecah gelombang.

b. Pengujian tahap II

Pengujian model tahap II dilakukan sebagai berikut.

1. Lima persen dari keseluruhan material gamapod dipotong salah satu kakinya.
2. Gamapod yang telah dipotong kakinya dicampur dengan separuh dari jumlah material yang utuh.

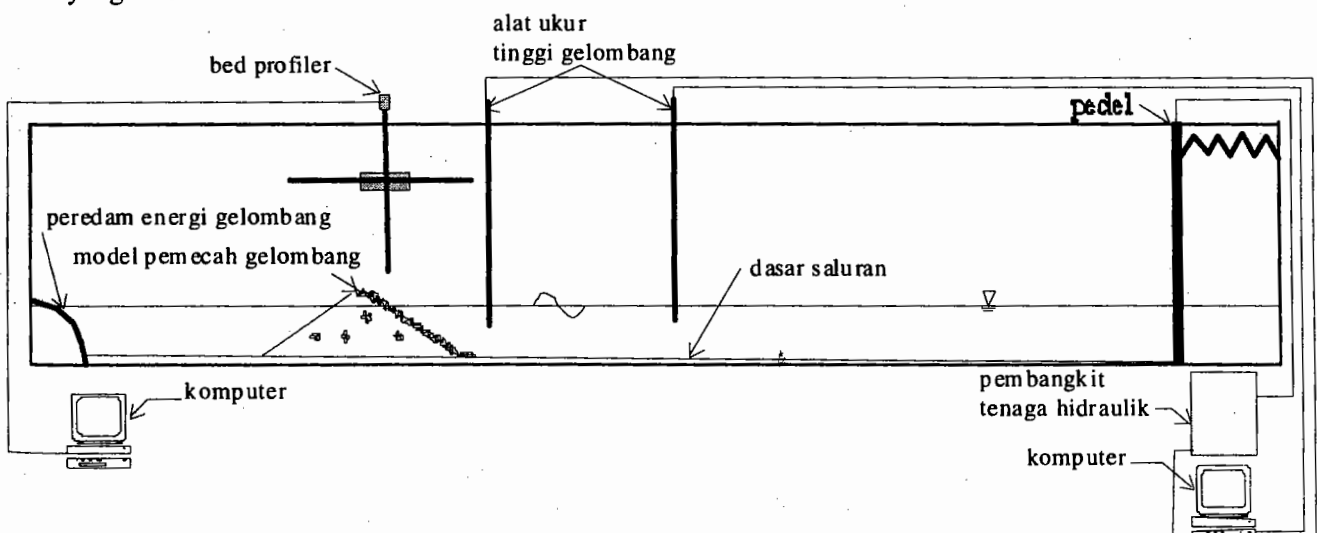
3. Separuh material gamapod yang utuh disusun terlebih dahulu sebagai lapis pertama, kemudian material yang telah dicampur dengan yang dipotong kakinya disusun di atasnya sebagai lapis kedua.
4. Hal-hal yang disebutkan pada nomor 2 sampai 5 pengujian tahap I dilakukan juga pada tahap ini. Pengujian yang sama dilakukan untuk 10% dan 15% gamapod yang dipotong salah satu kakinya.



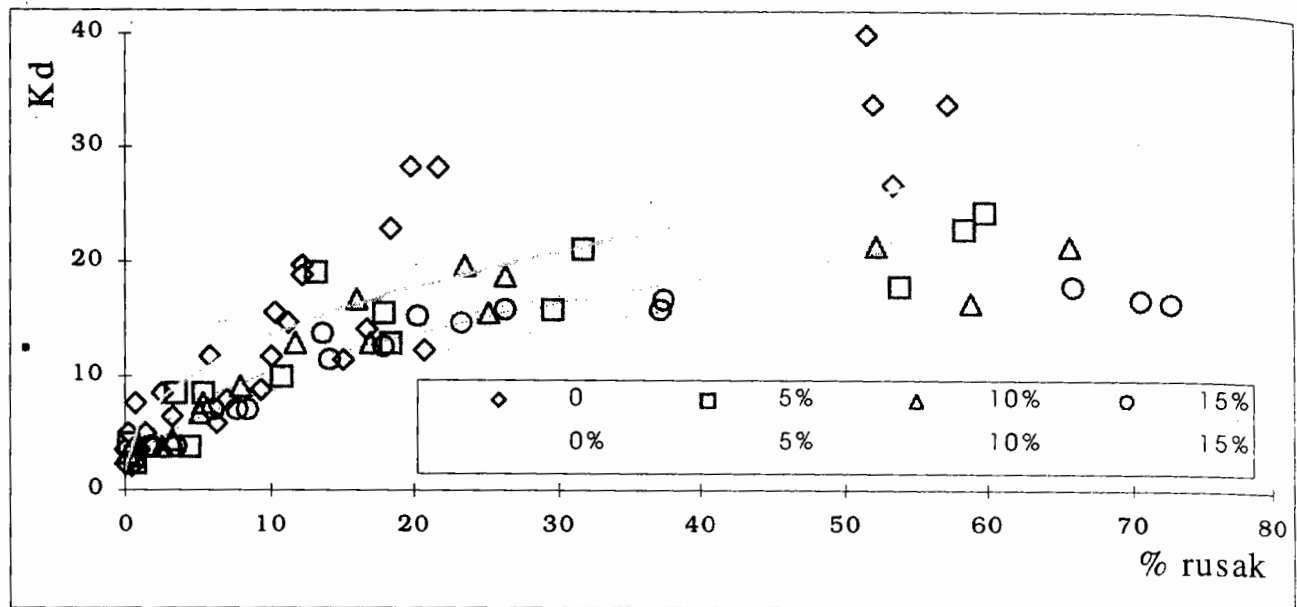
Gambar 6. Susunan material lapis lindung model pemecah gelombang

KERUSAKAN LAPIS LINDUNG GAMAPOD PADA BERBAGAI PERSENTASE JUMLAH GAMAPOD YANG DIPATAHKAN SALAH SATU KAKINYA

Kerusakan lapis lindung gamapod pada berbagai persentase jumlah gamapod yang dipatahkan salah satu kakinya disajikan dalam grafik pada gambar 7.



Gambar 5. Tata letak model pada saluran gelombang. (tanpa skala)



Gambar 7. Kd Gamapod sebagai fungsi gamapod yang patah kakinya dan persen rusak.

Harga koefisien stabilitas lapis lindung pada penelitian ini dihitung menggunakan rumus Hudson seperti pada persamaan (8). Dari grafik kerusakan lapis lindung gamapod dapat ditabelkan besarnya koefisien stabilitas yang menyebabkan kerusakan 1%, 5%, 10%, pada berbagai kondisi kaki gamapod yang bersangkutan (Tabel 1).

Tabel 1. Koefisien stabilitas pada kerusakan 1%, 5%, 10% pada berbagai kondisi kaki gamapod

Kerusakan (%)	Kd			
	patah 0%	patah 5%	patah 10%	patah 15%
1	5,50	3,96	3,86	3,03
5	10,34	7,90	7,69	6,30
10	13,58	10,64	10,29	8,64

Dari Gambar 7 terlihat bahwa pada kerusakan awal (<1%) koefisien stabilitas gamapod belum memberikan perbedaan yang besar untuk kondisi dipatahkannya kaki gamapod sejumlah 0%, 5%, 10% dan 15%. Hal ini karena perletakan material lapis lindung secara acak sehingga antar material lapis lindung belum berikatan sempurna. Pada awal pengujian dengan tinggi gelombang yang kecil material lapis lindung baru menempatkan diri pada posisi yang stabil. Pada kerusakan lebih dari 5% perbedaan koefisien stabilitas lapis lindung gamapod sudah terlihat jelas.

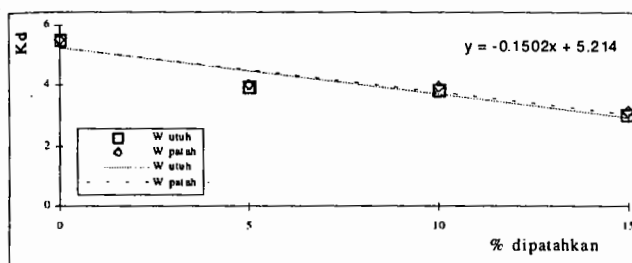
Perbedaan nilai Kd pada tingkat kerusakan dibawah 10% disebabkan karena material gamapod yang dipatahkan kakinya ditempatkan pada lapis

kedua dalam susunan lapis lindung. Hal ini mengakibatkan tingkat saling kunci antar material gamapod pada lapis kedua berkurang. Pada tingkat kerusakan tinggi (>10%) kerusakan lapis lindung gamapod terjadi pada lapis pertama. Pada keempat kondisi tersebut lapis pertama mempunyai kondisi yang sama yaitu tersusun dari material gamapod yang utuh semua kakinya sehingga pola kerusakannya pada keempat kondisi tersebut adalah sama. Akibat dari kondisi tersebut adalah untuk tingkat kerusakan yang sama pada berbagai kondisi kakinya, lapis lindung gamapod memberikan nilai koefisien stabilitas yang berbeda. Pada saat kaki gamapod masih utuh, koefisien stabilitas menunjukkan nilai yang paling besar dibandingkan dengan kondisi yang lain. Semakin besar persentase patahnya kaki gamapod nilai koefisien stabilitas makin kecil.

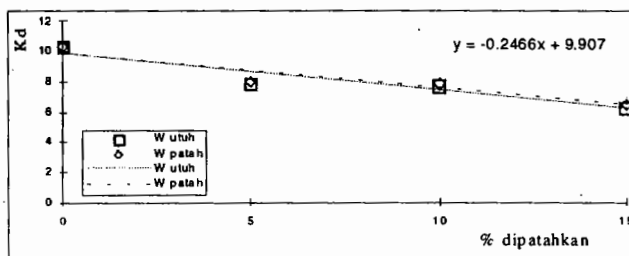
Pada tingkat kerusakan dibawah 10% derajat kesesuaian antara kerusakan dan Kd adalah tinggi. Penambahan Hs mengakibatkan penambahan tingkat kerusakan kecil, karena material lapis lindung pada lapis kedua yang terkena serangan gelombang masih mempunyai ikatan dengan lapis pertama. Pada tingkat kerusakan tinggi (>10%) material gamapod lapis pertama mulai mengalami kerusakan, sedangkan material lapis pertama ini sebagian hanya mempunyai ikatan dengan material yang ada di sebelah kanan kirinya. Penambahan Hs mengakibatkan penambahan tingkat kerusakan yang relatif lebih besar. Material lapis lindung yang mengalami kerusakan bukan hanya material yang terkena serangan gelombang, namun

terjadi pula pada material yang berada diatas daerah serangan gelombang. Hal ini karena gelombang yang datang menyerang bagian inti sehingga karena terkikisnya inti mengakibatkan longsornya material lapis lindung yang berada di lajur atasnya.

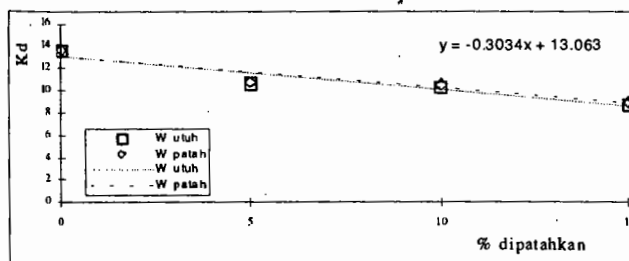
Grafik pada Gambar 7. diperoleh dengan anggapan bahwa berat gamapod yang dipatahkan satu kakinya sama dengan berat gamapod utuh (=31,3 gram). Sesungguhnya berat gamapod yang patah satu kakinya adalah 24,3 gram. Pada kondisi gamapod patah satu kakinya, maka berat gamapod dianggap merupakan berat rata-rata dari gamapod yang utuh dan yang patah. Perbandingan penurunan nilai Kd untuk keempat kondisi kaki gamapod pada kriteria kerusakan 1%, 5%, 10% dengan dua anggapan berat gamapod ditunjukkan pada Gambar 8.



a. Kerusakan 1%



b. Kerusakan 5%



c. Kerusakan 10%

Gambar 8. Grafik perbandingan penurunan nilai Kd Gamapod

Dari Gambar 8. terlihat bahwa perbedaan penurunan dengan dua anggapan berat gamapod diatas adalah sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa berkurangnya ikatan antar material gamapod lebih

besar pengaruhnya terhadap penurunan nilai Kd dari pada pengaruh berkurangnya berat gamapod. Untuk kondisi di lapangan (keperluan perancangan) maka anggapan berat gamapod yang digunakan adalah anggapan yang pertama yaitu berat gamapod adalah berat utuh. Hal ini karena dilapangan tidak bisa diketahui berat gamapod yang patah secara nyata. Dengan demikian untuk keperluan perancangan lapis lindung gamapod dengan kriteria kerusakan 1%, 5% dan 10%, maka apabila diperkirakan pada saat pemasangan dan masa pelayanannya ada material gamapod yang patah kakinya dalam jumlah tertentu (x%), agar stabilitas struktur sesuai dengan yang diharapkan maka koefisien stabilitas rancangan adalah untuk kondisi gamapod patah kakinya sampai x% dengan memasukkan nilai x pada grafik yang sesuai dengan kriteria kerusakannya. Dengan membuat rata-rata dari persamaan penurunan nilai koefisien stabilitas (Kd) terhadap persentase jumlah gamapod yang patah salah satu kakinya, maka dapat dibuat rumus umum untuk memperkirakan nilai koefisien stabilitas sebagai berikut :

$$Kd' = Kd - \frac{K}{4,7} \quad (13)$$

dengan Kd' koefisien stabilitas material gamapod apabila ada sebagian dari material gamapod patah salah satu kakinya, Kd koefisien stabilitas material gamapod apabila semua kainya utuh, K persen jumlah gamapod yang patah salah satu kakinya. Persamaan (13) hanya berlaku untuk matrial gamapod yang patah salah satu kakinya sampai 15%.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Bentuk material gamapod yang patah salah satu kakinya menyebabkan kekuatan saling kuncinya berkurang sehingga mengakibatkan stabilitas material gamapod berkurang.
2. Berkurangnya berat material gamapod akibat ada salah satu kakinya yang patah menyebabkan stabilitas material gamapod berkurang, walaupun pengaruhnya lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh berkurangnya kekuatan saling kunci.
3. Dengan pendekatan garis lurus, persamaan umum nilai koefisien stabilitas adalah sebagai berikut :

$$Kd' = Kd - \frac{K}{4,7} \quad (\text{berlaku untuk } K \leq 15\%)$$

dengan K adalah persen jumlah gamapod yang patah salah satu kakinya.

Saran

1. Pada saat perancangan apabila dimungkinkan adanya material gamapod yang patah kakinya, agar lapis lindung gamapod tetap dalam kondisi stabil, maka nilai K_d perlu disesuaikan. (disarankan pula oleh CUR, 1991).
2. Pada masa pemeliharaan perlu memperhitungkan adanya material gamapod yang patah kakinya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada (PAU IT-UGM), terutama Laboratorium Hidraulika dan Hidrologi yang telah memperkenankan penulis untuk melakukan penelitian di laboratorium tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- CERC, 1984, *Shore Protection Manual*, U.S. Army Corp of Engineering Vol II
- CIRIA/CUR, 1991, *Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering*, London, the Netherland.
- Coastal engineering II*, 1987, Elviesier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Dean, R.G. & Dalrymple, R.A., 1984, *Water Wave Mechanics For Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Jensen, 1984, *A Monograph On Rubble Mound Breakwater*, Danish Hidraulics Institut.
- Legawa, A.H.S., 1997, *Stabilitas lapis Lindung Batu Pecah Pada Struktur Pemecah Gelombang Non-overtopping*, Tugas Akhir, Program sarjana, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Sulistiyawati, S., 1995, *Stabilitas Lapis Lindung Campuran (Gamapod dan Batu Pecah) Pada Struktur Pemecah Gelombang*, Tugas Akhir, Program Sarjana, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Triatmadja, B., 1992, *Pelabuhan*, Bahan kuliah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Triatmadja, R dan Sulistiyawati, S., 1996, *The Stability of Gamapod and Mixed (Gamapod and Rubble), Armor Layer Models*, Media Teknik

Triatmadja, R. dan Tantrawati, E., 1994, *Gamapod As An Alternatif Armor layer*, Developments in Hydraulic Engineering and their impact on the Environment, Singapore

Winarno, D., 1994, *Stabilitas Tetrapod Dan Gamapod Sebagai Bahan Lapis Lindung Pemecah Gelombang Fleksibel*, Tugas akhir, Program Sarjana, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

DAFTAR NOTASI

- A : luas bidang permukaan unit lapis lindung yang terkena serangan gelombang
- A : luasan yang terisi material
- C_d : koefisien seret
- C_L : koefisien angkat
- D : diameter unit lapis lindung
- F_B : gaya apung
- F_R : resultan gaya hidrodinamik
- F_R' : resultan gaya hidrodinamik untuk gamapod patah salah satu kakinya
- g : percepatan gravitasi bumi
- H : tinggi gelombang
- H_{maks} : tinggi gelombang maksimum
- H_{rms} : akar rerata kuadrat tinggi gelombang
- H_S : tinggi gelombang signifikan
- K : K persen jumlah gamapod yang patah salah satu kakinya
- K_d : koefisien stabilitas
- K_d' : koefisien stabilitas material gamapod apabila ada sebagian dari material gamapod patah salah satu kakinya
- L : jarak pusat gaya terhadap pusat momen
- N : jumlah kejadian gelombang
- N : jumlah material seluas A
- n : jumlah lapis lindung
- P : porositas material lapis lindung
- u : kecepatan partikel air
- V : volume material lapis lindung
- W : berat material
- W' : berat gamapod yang patah salah satu kakinya
- α : koefisien kecepatan
- γ_s : berat jenis unit lapis lindung
- ρ_s : massa material
- ρ_w : massa jenis air
- π : bilangan 22/7
- θ : sudut kemiringan lereng
- ϕ : sudut resultan gaya hidrodinamik
- Δ : rapat massa relatif unit lapis lindung ($=\rho_s/\rho_w-1$)